

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Katedra fyzické geografie a geoekologie



Paleogeografická rekonstrukce kontinentálního zalednění
Šluknovské pahorkatiny

(souhrn)

Palaeogeographic reconstruction of the continental glaciation
in the Šluknov hilly land

(summary)

DANIEL NÝVLT

Praha, 2008

Předložená doktorská disertační práce vznikla během autorova studia na Katedře fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy a při práci v České geologické službě (do roku 2002 Českém geologickém ústavu) na projektu základního geologického mapování Šluknovského výběžku a na projektu Paleogeografická, paleoklimatologická a geochronologická rekonstrukce kontinentálního zalednění Česka.

Autor práce: Mgr. Daniel Nývlt
 Česká geologická služba, pobočka Brno
 Leitnerova 22
 658 69 Brno
 daniel.nyvlt@geology.cz

Školitel: Prof. RNDr. Jan Kalvoda, DrSc.

Konzultant: Doc. RNDr. Jiří Kovanda, CSc.

Úvod a vymezení práce

Během posledního půlstoletí byl nashromážděno velké množství nových dat, která přinesla základní údaje o zásahu kontinentálního ledovce do okrajových částí našeho území a následně upřesňovala znalosti o sedimentologických, geomorfologických, stratigrafických a paleogeografických aspektech zalednění těchto území (mj. Macoun et al. 1965, Šibrava 1967, Králík 1989, Macoun a Králík 1995, Nývlt 1998, 2003, Růžicka 2004 a mnoho dalších). Díky dřívější izolovanosti od okolních zemí však zůstávají některé otázky stále nezodpovězeny. Současné znalosti reliktní kontinentálního zalednění na našem území nejsou rozloženy rovnoměrně, snad nejlépe prozkoumanými se zdají být ostravská ledovcová pánev nebo hrádecká pánev. Naopak Šluknovsko nebylo z hlediska rozsahu a charakteru ledovcových sedimentů detailněji studováno. Zachovaných ledovcových reliktní je ve Šluknovském výběžku oproti lépe prozkoumaným oblastem výrazně menší množství (Nývlt 1998).

Předkládaná práce se zabývá paleogeografickou rekonstrukcí kontinentálního zalednění Šluknovské pahorkatiny. Území zpracovávané v této práci je vymezeno maximálním rozsahem ledovcových sedimentů (v nejširším slova smyslu) a nekryje se tudíž přesně s rozsahem Šluknovské pahorkatiny. Z německého území byl do této práce zahrnut pouze prostor bezprostředně přiléhající k českému území včetně klíčových lokalit a nálezů, jejichž interpretace má význam pro následně vyvozované závěry na našem státním území.

Metody výzkumu

Práce vychází z detailního geologického mapování Šluknovského výběžku, při němž autor předkládané práce zpracovával problematiku kvartérní geologie a geomorfologie se zvláštním zřetelem na ledovcové sedimenty. Další výzkum území probíhal v rámci projektu: Paleogeografická, paleoklimatologická a geochronologická rekonstrukce kontinentálního zalednění Česka. Při terénní práci byly dokumentovány veškeré sedimentární a geomorfologické projevy přítomnosti či blízkosti kontinentálního ledovce ve zkoumané oblasti. Ledovcové sedimenty byly studovány z hlediska fyzické sedimentologie a sedimentární petrologie. Geomorfologický výzkum byl zaměřen na studium projevů erozně-akumulačních procesů v ledovcovém systému při vzniku a vývoji ledovcových tvarů reliéfu. Pro zjištění stáří zásahu kontinentálního zalednění do prostoru Šluknovské pahorkatiny a pro stanovení rychlosti liniové eroze a plošné denudace byl využit kosmogenní radionuklid ^{10}Be .

Souhrn výsledků práce

Novým regionálním kvartérně geologickým a geomorfologickým výzkumem bylo rekonstruováno kontinentální zalednění Šluknovské pahorkatiny a přilehlých částí Lužických hor a Jetřichovických stěn. Rekonstrukce plošného rozsahu a linie maximálního zásahu kontinentálního ledovcového štítu ve Šluknovské pahorkatině byla provedena v měřítku 1:50.000 (viz Přílohu 1). Zhodnocení získaných údajů ukázalo na jeden cyklus/fázi zásahu kontinentálního ledovcového štítu do Šluknovské pahorkatiny. Relikty zalednění ve Šluknovské pahorkatině lze proto považovat za stratigraficky synchronní.

Kontinentální ledovec pokrýval během svého maximálního rozsahu prakticky celou v. část Šluknovské pahorkatiny. Během maximálního rozsahu zalednění zde z ledovce vystupovalo jen několik nunataků s vrcholky obvykle nad 450 m n. m. Čelní část kontinentálního ledovce postupovala jednotlivými splazy proti tokům preglaciálními fluviálními údolími Lužničky, Mandavy a levostranných přítoků Rožanského potoka. V j. části studovaného území se kontinentální ledovec opřel o hřeben lužickohorského Jedlovského hřbetu. Do centrální části Šluknovské pahorkatiny ledovec vstoupil údolím Rožanského potoka v prostoru dnešního města Šluknova, dále postupoval k Z přes sedlo mezi Špičákem a Partyzánským vrchem a postoupil do povodí Velkošenovského potoka. V morfologicky členitější z. části Šluknovské pahorkatiny kontinentální ledovec překonal svými okrajovými splazy několik sedlových sníženin v širším okolí Severní a Liščí.

Na základě poznatků o rozšíření jednotlivých typů ledovcových sedimentů, s přihlédnutím k dalším geomorfologickým zjištěním a ze znalosti subglaciální sedimentace byla rekonstruována maximální výšková hranice dosahu kontinentálního zalednění. Povrch ledovce ve svých nejvyšších částech odpovídal dnešním nadmořským výškám 470–480 m, byl však v celém prostoru Šluknovské pahorkatiny značně nerovný. To bylo způsobeno především jednotlivými a v podstatě nezávislými splazy okrajů kontinentálního ledovcového štítu, které do centrální části dnešního Šluknovska postupovaly prakticky téměř ze všech světových stran, kromě od jihu. Povrch kontinentálního ledovce v prostoru Šluknovské pahorkatiny ležel ve výškách 410–480 m, nejčastěji však ve výškách 430–450 m.

Hlavní směry postupu jednotlivých splazů kontinentálního ledovcového štítu probíhaly širokými preglaciálními údolími, pro zalednění Šluknovské pahorkatiny a vůbec celé severočeské zaledněné oblasti měl zásadní vliv Oderský splaz kontinentálního ledovce (Hesemann 1932, Piotrowski 1998, Marks 2002). Jeho šířka dosahovala v dolní Lužici (Niederlausitz) 30–50 km, dramaticky se však zužovala po vstupu do pahorkatinného reliéfu Horní Lužice (Oberlausitz). Ledovcový splaz, který postupoval širokým údolím Sprévy směrem k J označu-

jeme jako Sprévký ledovcový splaz. Dále pokračoval proti toku Rožanského potoka do prostoru dnešního města Šluknova a údolím horní Sprévy a Löbauer Wasser až do prostoru Ebersbachu a Jiřikova. Sprévký splaz měl v prostoru Horní Lužice (Oberlausitz) a Šluknovské pahorkatiny mezi Schirgiswalde a Šluknovem během postupové fáze šířku 5–6 km. Zjištěné směry jeho postupu jsou nejčastěji od S k J, příp. od SSV k JJZ. V. a jv. část Šluknovské pahorkatiny (prostor v okolí Varnsdorfu a Dolního Podluží) byla zasažena Mandavským ledovcovým splazem, který postupoval od širokého údolí Lužické Nisy proti tokům řek Mandavy a Lužničky do širšího prostoru dnešního Varnsdorfu. Tento ledovcový splaz lze rozdělit na dvě části. Obě dílčí části tohoto splazu se spojovaly v prostoru dnešního Rumburku a Neuersdorfu. Na českém území se Mandavský ledovcový splaz pohyboval ve směru SV–JZ až V–Z. Hraničním územím Sprévského a Mandavského ledovcového splazu byla zóna, která v podstatě odpovídá dnešnímu hlavnímu evropskému rozvodí povodí Labe a Odry. V tomto území se orientace pohybu víceméně S–J (s. část Šluknovska) a V–Z (v. část Šluknovska) kříží.

Využití orientace protažení oblíkových elevací pro rekonstrukci směru postupu kontinentálního ledovce ve studovaném území je limitováno. Tyto směry totiž odpovídají jak strukturní predispozici reliéfu, tak erozním účinkům postupujícího ledovcového splazu. Navíc rozsah odnosu materiálu z povrchových partií elevací v hodnotě 10 m od deglaciacce zjištěný in situ tvořeným kosmogenním radionuklidem ^{10}Be svědčí o tom, že jejich dnešní povrch nepřišel do přímého kontaktu s ledovcem.

Glacigenní akumulace s původními morfologickými tvary jsou v prostoru Šluknovské pahorkatiny zachovány spíše výjimečně. Během postupové fáze zalednění docházelo na tillových plošinách k ukládání subglaciálních tillů v mocnostech 3–5 m. Vyšší přednostní orientace klastů v subglaciálních tillech ukazuje na vyšší vliv vytávacích subglaciálních procesů při proudovém třídění materiálu vodou, které se výrazně uplatňovaly na většině území Šluknovska. Proto byly převážná část rozhraní mezi ledovcem a podložím a také nejspodnější vrstva vlastního ledovce dobře zásobovány vodou a ledovec měl na většině území Šluknovské pahorkatiny „teplou“ bázi. Docházelo tak vlivem střížného tlaku k prostému smyku a hlavní pohyb ledovce probíhal bazálním klouzáním po ledovcovo-podložním rozhraní. Pouze ve zvýšených částech reliéfu a v místech bez deformovatelného nezpevněného a permeabilního podloží docházelo vlivem střížného tlaku k subglaciální deformaci převážně nezpevněného ledovcového podloží. Při deformační fázi bylo porušováno podloží ledovce duktilní až křehkou deformací. Tento proces mohl probíhat pouze u ledovce s lokálně suchou/chladnou bází, kdy ledovcovo-podložní rozhraní není saturováno tavnými vodami. Terminoglaciací sedí-

mentace byla během postupové fáze zalednění málo významná, protože tavné vody byly subglaciálně odváděny ve směru sklonu podložního reliéfu mimo území Šluknovska. Její projevy se dochovaly pouze ve formě zbytků čelních/bočních morén na kontaktu Sprévského a Mandavského ledovcového splazu poblíž hlavního evropského rozvodí. Relikty těchto morén jsou ve své z. části překryté sedimenty kamové terasy ukládané na kontaktu obou splazů během iniciální fáze deglaciace.

Pro ústupové fáze zalednění je typická rozsáhlá plošná terminoglaciální a proglaciální sedimentace. V členitém reliéfu byla tato sedimentace výrazně usměrňována do preglaciálně vzniklých údolí, kde sedimentovaly glacifluviální sedimenty. Široké údolí Sprévy v úseku mezi Ebersbachem a Sohlandem představovalo preglaciálně predisponované terminoglaciální koryto, kudy byly odváděny tavné ledovcové vody Sprévského ledovcového splazu během kulminace zalednění a na počátku deglaciace. Glacifluviální výplň terminoglaciálního údolí Sprévy, dokumentovaná na lokalitě Fukov, byla ukládána ve střední až distální části divočího systému. Docházelo zde k laterální migraci několika hlavních koryt se střední až vyšší sinuositou, které byly dostatečně dotovány především písčitým až jemným štěrkovým materiálem během period vyšších průtoků, vázaných na denní nebo jiný krátkodobý cyklus průtoků v morfologicky uzavřeném údolním systému. V některých případech byly dokumentovány cykly postupného vzdalování čela ledovce, což nasvědčuje proglaciální sedimentaci během ústupové fáze zalednění. Modelováním stáří akumulace a rychlosti eroze této akumulace kosmogenním radionuklidem ^{10}Be bylo zjištěno snížení povrchu na lokalitě Fukov o 15,7 m od deglaciace před ~606 ka. Původní mocnost akumulace glacifluviálních sedimentů musela být větší než 30 m. Relikty obdobných údolních proglaciálních výplavových plošin se zachovaly v údolích Lučního, Liščího a Velkošenovského potoka.

Plošné proglaciální výplavové plošiny s typickou sandrovou sedimentací se nacházejí v reliktech především ve v. části Šluknovské pahorkatiny a vykazují sedimentární textury typické nejčastěji pro proximální až střední části proglaciálního glacifluviálního systému s převládající poproudovou akrecí materiálu uvnitř mělkých a relativně širokých koryt. Tato sedimentace probíhala v iniciální fázi deglaciace území prakticky na celém území. Takto vzniklé plošné výplavové plošiny měly zřejmě menší mocnost sedimentů a byly následnými erozně-denudačními procesy z velké části odstraněny a zachovaly se pouze v erozních reliktech, které nám přesto umožňují rekonstruovat jejich původní rozsah.

Z petrologického a provenienčního hlediska je podstatné odlišení „otevřených lokalit“ od „morfologicky ovlivněných lokalit“ podle podílů jednotlivých petrotypů a provenienčních skupin zastoupených na daných lokalitách glacifluviálních sedimentů. Rozdíly jsou patrné

především v podílech distální složky neseného materiálu, kam zahrnujeme provenienčně blízké a nordické horniny. Obecně je podíl distální materiálové složky (a to včetně nordických hornin) na otevřených lokalitách Šluknovska vyšší (~30 %), než jsou běžné hodnoty pro celou severočeskou oblast kontinentálního zalednění (~15 %). Naopak u lokalit morfologicky ovlivněných je tento podíl nižší a představuje pouze ~4 %. Tyto rozdíly dokládají vliv místní morfologie na sedimentaci glaci-fluviálních sedimentů ve Šluknovské pahorkatině. Souvková společenstva zjištěná na jednotlivých lokalitách Šluknovska jsou odlišná, což se projevuje i v rozdílných hodnotách TGZ. V rámci celého zaledněného území severních Čech je lokalita Fukov naprosto unikátní dominancí dalarnských hornin a ochuzením ålandských hornin. Odlišnosti ve společenstvu vůdčích nordických souvků na lokalitě Fukov lze vysvětlit selektivním ochuzením ålandských, převážně granitoidních hornin, čemuž nasvědčuje i nejnižší hodnota G/P koeficientu pro tuto lokalitu.

Modelováním úbytku koncentrace kosmogenního radionuklidu ^{10}Be s hloubkou na lokalitě Fukov bylo možné stanovit délku expozice daného povrchu a průměrnou rychlost jeho eroze. Modelováním obou závislých (tedy délky expozice/stáří uložení a rychlosti eroze povrchu) bylo získáno nejvhodnější řešení pro stáří 605.510 ± 52.710 let BP při průměrné rychlosti eroze $25,9 \pm 2,3$ m/Ma. Toto stáří se vztahuje k počátku ústupové fáze kontinentálního zalednění, které do Šluknovské pahorkatiny zasáhlo. Zásah čelní části kontinentálního ledovce do Šluknovské pahorkatiny je možné korelovat s MOIS 16, který kulminoval před 620–635 ka. Za předpokladu zalednění Šluknovské pahorkatiny během MOIS 16 je možné korelovat tuto událost s okolními oblastmi a také s globálním paleoklimatickým záznamem.

Korelací regionálních výsledků výzkumu Šluknovské pahorkatiny s okolními oblastmi lze zalednění studovaného území paralelizovat s glaciálem b v rámci Cromerského komplexu v Nizozemsku (Zagwijn 1992, 1996), s glaciálem Elster 1 (Zwickauer Phase) v Německu (Wolf 1980, Šibrava et al. 1986, Eissmann 1997, 2002) a s glaciálem San 1 definovaném v Polsku (Lindner a Marks 1995, Lindner et al. 2004). Na Ostravsku a Opavsku odpovídá opavskému zalednění (Macoun 1980, 1985, Macoun a Králík 1995), v severních Čechách zalednění valdovskému (Králík 1989, Macoun a Králík 1995). Korelace s cvikovskou fází (Zwickauer Phase) elsterského glaciálu ve v. části Německa ukazuje na neudržitelnost konceptu komplexu elsterského zalednění podle Eissmanna (1975, 1997, 2002), který řadí oba zásahy kontinentálního zalednění během Elsteru do jednoho stupně (MOIS 12). To je v rozporu se současnými znalostmi ze severočeské zaledněné oblasti, kde jsou jednoznačně doložena dvě samostatná „elsterská“ zalednění, která proběhla během MOIS 16 a 12 a jsou od sebe časově vzdálena ~200 ka. Jako správná se naopak jeví stratigrafická paralelizace užívaná

v Polsku (m.j. Lindner et al. 2004), která obě jihopolská zalednění považuje za samostatná a koreluje glaciály San 1 a 2 s MOIS 16 a 12.

Na základě stanovení délky expozice povrchů a rychlosti jejich eroze pomocí kosmogenních radionuklidů bylo možné ve Šluknovské pahorkatině zjistit průměrné rychlosti liniové a plošné eroze pro období posledních ~600 ka. Zdejší rychlost liniové eroze ($25,9 \pm 2,3$ m/Ma) je ve srovnání s oblastí vnitřních Čech čtvrtinová až třetinová a přibližně poloviční oproti průměrným rychlostem zahlubování větších západoevropských řek. Plošná denudace exponovaných povrchů oblíkových elevací probíhá na Šluknovsku průměrnou rychlostí $16,9 \pm 4$ m/Ma, což lze považovat za minimální hodnoty eroze v daném území. Naopak liniová říční eroze představuje v tomto území maximální hodnotu eroze. Pro celou oblast Šluknovské pahorkatiny lze proto průměrnou rychlost plošné denudace stanovit na 15–25 m/Ma.

Introduction and research specification

Huge amount of new data bringing basic data about the continental glacier advance into the peripheral areas of the Czech territory have been gathered during the last half of the century; they were subsequently precised in the sense of sedimentological, geomorphological, stratigraphical and palaeogeographical aspects of the glaciation of these areas (e.g. Macoun et al. 1965, Šibrava 1967, Králík 1989, Macoun a Králík 1995, Nývlt 1998, 2003, Růžička 2004 and many others). Some questions still remain unresolved owing to former isolation from adjacent countries. Present knowledge of the continental glaciation relics from our territory are not distributed equally, the best explored seem to be the Ostrava and Hrádek basins. The Šluknov area was on the contrary not studied in detail concerning extent and nature of glacial sediments. Preserved glacial relics are in the Šluknov Spur markedly less common compared to better explored areas of Czechia (Nývlt 1998).

The present work deals with palaeogeographical reconstruction of the continental glaciation in the Šluknov hilly land. The studied area is delimited by the maximum extent of glacial sediments (in the widest sense) and does not coincide accurately with the limitation of the Šluknov hilly land. Only the German territory adjacent directly to the Czech area including key sites and finds there are enclosed in this study to complete interpretations and conclusions drawn from our state territory.

Research methods

The study goes from detailed geological mapping of the Šluknov Spur, during which the author of this study worked on the Quaternary geology and geomorphology with particular respect to glacial sediments. Further research continued within the project: Palaeogeographical, palaeoclimatological and geochronological reconstruction of the continental glaciation of Czechia. All sedimentary and geomorphical exhibitions of the former presence or proximity of continental glacier were documented during the fieldwork. Glacial sediments were studied from the viewpoint of physical sedimentology and sedimentary petrology. Geomorphological research was focused on the study of erosion-accumulation processes in the glacial system during the formation of glacial landforms. Cosmogenic radionuclide ^{10}Be was applied to ascertain the age of the continental glacier advance into the Šluknov hilly land and for the assessment of the linear erosion and areal denudation rates.

Summary of research results

New regional Quaternary geological and geomorphological research was used to reconstruct continental glaciation of the Šluknov hilly land and adjoining areas of the Lusatian Mts. and Jetřichovice walls. The reconstruction of areal extent and the maximum advance of the continental ice sheet in the Šluknov hilly land were designed in the scale 1:50,000 (see Appendix 1). The evaluation of available data pointed at one cycle/phase of the continental ice sheet advance into the Šluknov hilly land. Glacial relics in the Šluknov hilly land are therefore considered stratigraphically synchronous.

Continental glacier covered during its maximum extent nearly entire eastern part of the Šluknov hilly land with only some nunataks with hilltops over 450 m a.s.l. The frontal part of the continental glacier advanced by individual tongues upstream the preglacial fluvial valleys of Lužnička and Mandava rivers and left-hand tributaries of the Rožany Brook. Continental glacier leaned against the Jedlová Ridge of the Lusatian Mts. in the southern part of the studied area. Ice sheet penetrated into the central part of the Šluknov hilly land through the valley of the Rožany Brook in the area of present Šluknov town and advanced towards the west crossing over the col between Špičák and Partyzánský hill to the catchment of the Velkošenovský Brook. Continental glacier crossed in the morphologically more rough western part of the Šluknov hilly land by its peripheral tongues over some col depressions in the wider surroundings of Severní and Liščí villages.

The maximum altitude of the continental glaciation extent was reconstructed based on the findings of the distribution of individual glacial sediments and with respect to other geomorphological assignments. Glacier surface in its highest parts lied in the altitude corresponding to the present 470–480 m a.s.l., however the surface was in the whole area of the Šluknov hilly land considerably uneven. This was caused mainly by individual and in principle independent glacial marginal lobes of the continental ice sheet, which advanced into the central part of the Šluknov Spur from all cardinal directions except from the South. The surface of the continental glacier lied in the Šluknov hilly land in altitudes of 410–480 m a.s.l., but most frequently in altitudes of 430–450 m a.s.l.

The main advance directions of individual lobes of the continental ice sheet were through wide preglacial valleys. The Odra Lobe (Hesemann 1932, Piotrowski 1998, Marks 2002) was dominant for the Šluknov hilly land and for the whole northern Bohemian glaciated area. Its width reached 30–50 km in the Lower Lusatia (Niederlausitz), but it decreased dramatically entering the rolling upland relief of the Upper Lusatia (Oberlausitz). The glacier lobe advancing through the wide valley of the Spree River towards the South is called Spree

Lobe. It continued in the advance upstream the Rožanský Brook into the area of the present Šluknov town and through the upper reaches of Spree and Löbauer Wasser up to surroundings of Ebersbach and Jiřikov. The Spree Lobe was during its advance phase 5–6 km wide in the territory of Upper Lusatia and in the Šluknov hilly land between the towns of Schirgiswalde and Šluknov. Its ascertained advance direction are most frequently from the North towards the South, event. from NNE towards SSW. Eastern and southeastern part of the Šluknov hilly land (the surroundings of Varnsdorf and Dolní Podluží) was affected by the Mandau Lobe, which advanced from the wide valley of the Lusatian Neisse upstream of the Mandau and Lužnička rivers into the surroundings of present town Varnsdorf. This lobe could be divided into two parts. Both fragment of this lobe aggregated in the area of present towns Rumburk and Neugersdorf. The Mandau Lobe flowed in the NE–SW to E–W direction on the Czech territory. The border area of the Spree and Mandau lobes was the zone, which basically corresponds to the main European watershed between the Elbe and Oder river catchments. The advance orientations of nearly N–S (northern part of the Šluknov hilly land) and E–W (eastern part of the Šluknov hilly land) interfere in this area.

The use of the *roche moutonnées* elevations' elongations for the reconstruction of the continental glacier advance directions is limited in the study area. These directions correspond both to the structural relief predisposition and to the erosion activity of advancing glacier lobe. Beside that, the volume of the material removal from the surface parts of the elevations of 10 m since the deglaciation ascertained by the in situ-produced cosmogenic radionuclide ^{10}Be bears evidences, that their present surface never experienced direct contact with a glacier.

Glacigenic accumulations with original morphological forms are in the Šluknov hilly land territory preserved rather exceptionally. Subglacial tills were deposited in thickness of 3–5 m on the till plains during the advance phase of the glaciation. The higher preferential till fabrics in subglacial tills shows on the higher effect of the subglacial melt-out processes during the water flow sorting of the carried material, which affected most of the Šluknov hilly land area. Therefore most of the glacier-bedrock interface and also the debris-rich ice of the glacier were well supplied by water and the glacier was wet-based over the most of the Šluknov hilly land. Simple shear was the primary agent forcing the glacier advance in the subglacial zone and the main glacier motion took place as basal sliding over the glacier-bedrock interface. Subglacial deformation of mostly incoherent substrates occurred due to simple shear only in the elevated parts of the relief and in places without deformable bed and permeable substrate. The glacier substrate was affected by ductile and brittle deformation dur-

ing the deformation phase. This process may proceed only by a locally dry/cold-based glacier, when the glacier-substrate interface is not saturated by meltwaters. Terminoglacial sedimentation was less important during the advance phase of the glaciation, because the meltwaters were carried subglacially away in the dip direction of the underlying relief out of the studied area. Its demonstration was preserved only in forms of relics of frontal/lateral moraines in the contact zone of the Spree and Mandau lobes near the main European watershed. Relics of these moraines are in their western parts covered by kame sediments, which were deposited on the contact of both lobes during initial phase of deglaciation.

Extensive areal terminoglacial and proglacial sedimentation is typical for the deglaciation phases of the glaciation. This glaciofluvial sedimentation was markedly directed into the preglacial valleys in the rugged relief. The wide valley of the Spree River in the sector between Ebersbach and Sohland formed preglacially predisposed terminoglacial channel, which carried away glacier meltwaters of the Spree Lobe during the maximum extent of the glaciation and at the beginning of the deglaciation. The glaciofluvial infill of the terminoglacial Spree valley documented at the Fukov site was deposited in the middle to distal reaches of a braided system. Lateral migration of several main channels with average to higher sinuosity was in progress here. These channels were sufficiently supplied mainly by sandy to fine gravel material during periods of higher discharges connected with daily or other short-time discharge cycle in a morphologically closed valley system. Cycles of gradual glacier front recessions were documented in some cases, which suggests to the proglacial sedimentation during the deglaciation phase of the glaciation. The lowering of the surface at the Fukov site of 15,7 m since the deglaciation 606 ka ago was established by the modelling of the accumulation age and the erosion rate of this accumulation using cosmogenic radionuclide ^{10}Be . The original thickness of the glaciofluvial accumulation must had been greater than 30 m. Relics of similar valley proglacial outwash plains are preserved in the valleys of Luční, Liščí and Velkošenovský brooks.

Planar proglacial outwash plains with typical sandur sedimentation could be found in relics mainly in the eastern part of the Šluknov hilly land. They display sedimentary structures characteristic for proximal to middle reaches of the proglacial glaciofluvial system with prevailing downstream accretion of the material within the shallow and relatively wide channels. This sedimentation occurred in the initial phase of the deglaciation nearly over the whole area. Thus evolved planar outwash plains had lower thickness of sediments and were largely removed by subsequent erosion-denudational processes. They remained only in erosional relics, which still enable us to reconstruct their original extent.

Differentiation of “open sites” and “morphologically influenced sites” according to the shares of individual petrotypes and provenance groups at individual localities of the glaciofluvial sediments is essential from petrological and provenance point of view. Distinctions are apparent mainly in the shares of the distal component of the carried material, which includes near and Nordic rocks. Generally the share of the distal component (including Nordic rocks) at the open sites of the Šluknov hilly land is higher (~30 %) than are the common values for the whole northern Bohemian glaciated area (~15 %). This share is significantly lower for morphologically influenced sites and amounts only ~4 %. These differences illustrate the influence of the local morphology on the sedimentation of glaciofluvial sediments in the Šluknov hilly land. Indicator assembly ascertained at individual sites of the Šluknov hilly land are different, which expressed also in diverse TGZ values. The Fukov site is absolutely unique within the whole glaciated area of northern Bohemia due to the dominance of the rocks from Dalarna and by the depletion of the Åland islands rocks. Differences in the indicator assembly at the Fukov site could be explained by the selective depletion of the Åland mainly granitoid rocks, which is supported also by the lowest G/P value for this locality.

The exposure age of the given surface and its average erosion rate was established by the modelling of the decrease of the cosmogenic radionuclide ^{10}Be concentrations with depth at the Fukov site. The best-fitted solution of the modelling of both dependents (exposure/deposition age and erosion rate) was obtained for the exposure age of $605,510 \pm 52,710$ years BP with the average erosion rate of $25,9 \pm 2,3$ m/Ma. This age refers to the initial deglaciation phase of the continental glaciation, which advance in to the Šluknov hilly land. The impact of the frontal part of the continental glacier into the Šluknov hilly land could be correlated with MOIS 16, which culminated 620–635 ka BP. In assumption of the continental glaciation of the Šluknov hilly land during the MOIS 16 it is possible to correlate this event with adjacent areas and also with global palaeoclimatic record.

Correlation of regional research results from the Šluknov hilly land with adjacent areas enable to parallelized the glaciation of the studied area with Glacial b in the Cromex complex in the Netherlands (Zagwijn 1992, 1996), with glacial Elster 1 (Zwickauer Phase) in Germany (Wolf 1980, Šibrava et al. 1986, Eissmann 1997, 2002) and with glacial San 1 defined in Poland (Lindner and Marks 1995, Lindner et al. 2004). It corresponds to the Opava glaciation in the Ostrava and Opava regions (Macoun 1980, 1985, Macoun and Králík 1995) and to the Valdov glaciation in northern Bohemia (Králík 1989, Macoun and Králík 1995).

The correlation with the Zwickauer Phase of the Elsterian glacial in the Eastern Germany shows on the indefensibility of the concept of the Elsterian complex of glaciations

sensu Eissmann (1975, 1997, 2002), who connect both Elsterian glaciations with one stage (MOIS 12). This is in discrepancy with recent knowledge from the northern Bohemian glaciated area, where two individual Elsterian glaciations are evidenced. They go back to MOIS 16 and 12 and are separated by a time interval of ~200 ka. The stratigraphic correlation used in Poland (e.g. Lindner et al. 2004), which consider both South Polish glaciation as separated and correlate the San 1 and 2 glacials with MOIS 16 and 12, could be on the contrary manifested as a correct one.

The average linear erosion rates and areal denudation rates were determined for the time period of the last ~600 ka in the Šluknov hilly land based on the assessment of the surface exposure age and its average erosion rate using cosmogenic radionuclide ^{10}Be . The local linear erosion rate ($25,9 \pm 2,3$ m/Ma) is quarter to third in comparison with the area of inner Bohemia and half compared to the average fluvial erosion rates of the main western European rivers. The denudation of the exposed surfaces of roche moutonnée elevations proceeded with the average rate of $16,9 \pm 4$ m/Ma in the Šluknov territory. This could be considered as the minimum erosion rate in the given area. Linear erosion represents on the other hand maximum erosion value in the studied area. The average rate of the areal denudation could be determined at 15–25 m/Ma for the whole Šluknov hilly land area.

References

- Eissmann, L. (1975): Das Quartär der Leipziger Tieflandsbucht und angrenzender Gebiete um Saale und Elbe. Schriftenreihe der Geologischen Wissenschaften, 263 pp., Berlin.
- Eissmann, L. (1997): Das quartäre Eiszeitalter in Sachsen und Nordostthüringen. Altenburger Naturwissenschaftliche Forschungen, 8, Altenburg.
- Eissmann, L. (2002): Quaternary geology of eastern Germany (Saxony, Saxon-Anhalt, South Brandenburg, Thuringia), type area of the Elsterian and Saalian Stages in Europe. Quaternary Science Reviews, 21, 1275–1346.
- Hesemann, J. (1932): Zur Geschiebeführung und Geologie des Odergletschers. 1. Äussere, Rosenthaler und Velgaster Randlage. Jahrbuch des Preussischen geologischen Landesanstalt, 53, 70–84.
- Králík, F. (1989): Nové poznatky o kontinentálních zaledněných severních Čech. Sbor. geol. Věd, Antropozoikum, 19, 9–74.
- Lindner, L., Gozhik, P., Marciniak, B., Marks, L., Yelovicheva, Y. (2004): Main climatic changes in the Quaternary of Poland, Belarus and Ukraine. Geological Quarterly, 48, 97–114.
- Lindner, L., Marks, L. (1995): Zarys paleogeomorfologii obszaru Polski podczas zlodowaceń skandynawskich. Przegląd Geologiczny, 43, 7, 591–594.
- Macoun, J. (1980): Paleogeografický a stratigrafický vývoj Opavské pahorkatiny v pleistocénu. Časopis Slezského muzea v Opavě, řada A, 29, 113–132; 193–222.

- Macoun, J. (1985): Stratigrafie středního pleistocénu Moravy ve vztahu k evropskému kvartéru. Časopis Slezského muzea, řada A, 34, 125–143; 219–237.
- Macoun, J., Králík, F. (1995): Glacial history of the Czech Republic. In: Ehlers, J., Kozarski, S., Gibbard, P. L. (Eds): Glacial deposits in North – East Europe. 389–405, A. A. Balkema, Rotterdam.
- Macoun, J., Šibrava, V., Tyráček, J., Kneblová-Vodičková, V. (1965): Kvartér Ostravska a Moravské brány. Nakladatelství ČSAV, Praha.
- Marks, L. (2002): Last Glacial Maximum in Poland. Quaternary Science Reviews, 21, 103–110.
- Nývlt, D. (1998): Kontinentální zalednění severních Čech. Geografie–Sborník ČGS, 103, 445–457.
- Nývlt, D. (2003): Geomorphological aspects of glaciation in the Oldřichov Highland, Northern Bohemia, Czechia. Acta Universitatis Carolinae – Geographica, 35, Supplementum, 171–183.
- Piotrowski, J. (1998): Development of the Odra Lobe. INQUA Commission on Glaciation, The Peribaltic Group: Field Symposium on Glacial Geology at the Baltic Sea Coast in Northern Poland, Excursion Guide, 16 pp., Warsaw.
- Růžička, M. (2004): The Pleistocene glaciation of Czechia. In: Ehlers J., Gibbard P.L. (Eds): Quaternary Glaciations – Extent and Chronology. Part I: Europe. Developments in Quaternary Science, 2, 27–34, Elsevier B.V., Amsterdam.
- Šibrava, V. (1967): Study on the Pleistocene of the glaciated and non-glaciated area of the Bohemian Massif. Sborník Geologických Věd, Antropozoikum, 4, 7–38.
- Šibrava, V., Bowen, D. Q., Richmond, G. M., eds (1986): Quaternary glaciations in the Northern Hemisphere. Quaternary Science Reviews, 5, 1–514.
- Wolf, L. (1980): Die Elster und präelsterkaltzeitlichen Terrassen der Elbe. Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, 8, 1267–1280.
- Zagwijn, W. H. (1992): The beginning of an Ice Age in Europe its major subdivisions. Quaternary Science Reviews, 11, 583–591.
- Zagwijn, W. H. (1996): The Cromerian Complex Stage of the Netherlands and correlation with other areas in Europe. In: Turner, C. (Ed.): The Early Middle Pleistocene in Europe. 145–172. A. A. Balkema, Rotterdam.